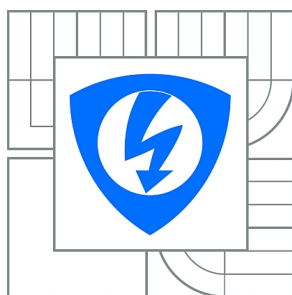




# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MĚŘENÍ VLHKOSTI BIOLOGICKÝCH STRUKTUR

MEASUREMENT OF BIOLOGICAL STRUCTURES HUMIDITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JÁCHYM VLK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRIEDL

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Jáchym Vlk

**ID:** 125338

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření vlhkosti biologických struktur

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření biologických struktur. Blíže popište existující senzory a jejich vlastnosti. Navrhněte vlastní uspořádání senzoru a elektroniky pro zpracování signálu ze senzoru. Realizujte navržený senzor s měřicí elektronikou a proveďte měření ověřující jeho parametry.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLAŠIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2011. 448 stran s. ISBN 80-7300-156-X.

[2] -, Elektrotechnická měření. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 256 s. ISBN 978-80-7300-022-6.

[3] FRIEDL, M., MARCOŇ, P., FIALA, P., KUBÁSEK, R. Measurement of concentration and water flow. In Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2011 Marrakesh. Cambridge: 2011. s. 1153-1157. ISBN: 978-1-934142-16- 5.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Friedl

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Práce shrnuje známé metody měření kapalin a vlhkosti u komplikovaných biologických struktur. Jsou zde uvedeny a popsány jednotlivé metody i jejich princip. Práce zahrnuje popis a tvorbu indukčního a kapacitního senzoru. Jsou zde uvedené informace pro vytvoření indukčního i kapacitního senzoru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Transpirační proud, destruktivní a nedestruktivní senzory, proudění kapalin, biologické struktury, ATmega16.

## **ABSTRACT**

The work summarizes known methods about measuring liquids and humidity in complicated biological structures. Particular methods and their principles are stated and described here. This work includes description and creation of inductive and capacitive sensor as well as information for creating inductive and capacitive sensor.

## **KEYWORDS**

Transpiration stream, destructive and nondestructive sensors, fluid flow, biological structures, Atmega16.

VLK, J. *Měření vlhkosti biologických struktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Friedl.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření vlhkosti biologických struktur jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Friedlovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>vii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 METODY MĚŘENÍ</b>	<b>2</b>
1.1 Destruktivní metody .....	2
1.1.1 Metoda tepelné bilance (HBM) .....	2
1.1.2 Metoda tepelného pulzu (HPV) .....	3
1.1.3 Metoda tepelné bilance kmene s přímým elektrickým ohřevem pletiv a vnitřním měřením teploty (THB).....	3
1.2 Nedestruktivní metody.....	5
1.2.1 Indukční metoda .....	5
1.2.1.1 Číslicové měřiče impedancí.....	6
1.2.1.2 Měření impedance integrovaným obvodem AD5934.....	7
1.2.2 Kapacitní metoda .....	8
1.2.2.1 Kapacitní snímače.....	10
<b>2 NÁVRH SENZORU</b>	<b>13</b>
2.1 Návrh programu.....	15
2.1.1 VEE.....	15
2.2 Schéma programu .....	17
2.3 Vývojový diagram programu.....	18
<b>3 Realizace senzoru</b>	<b>19</b>
3.1 Induktivní senzor .....	19
3.1.1 Výsledky měření .....	21
3.2 Kapacitní senzor .....	23
3.2.1 ATmega16 .....	24
3.2.2 Vývojový diagram kapacitního senzoru .....	26
3.2.3 Měření.....	27
3.2.3.1 Naměřené hodnoty.....	27

<b>ZÁVĚR</b>	<b>30</b>
<b>Literatura</b>	<b>31</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>32</b>
<b>Přílohy</b>	<b>34</b>
<b>Schéma zapojení</b>	<b>36</b>
<b>Seznam součástí</b>	<b>37</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Schéma čidla metody tepelné bilance pro malé stonky. Převzato [1].....	2
Obr. 2	Aplikace systému Sapflow Meter SF300. Převzato [13] .....	3
Obr. 3	Uspořádání tenkých nerezových elektrod v nichž jsou zavedeny série termočlánků aplikované do kmene. Převzato z [1].....	3
Obr. 4	Detail vícebodové jehlice s více termočlánky označenými A a B.....	4
Obr. 5	Podélný řez kmenem Douglaské jedle s aplikací dvou čidel. Převzato [14] .	4
Obr. 6	Princip elektronicky vyvažovaného můstku pro měření impedancí. Převzato [4].....	6
Obr. 7	Impedanční konvertor AD5934–blokové schéma. Převzato [4].....	7
Obr. 8	Obrázek vlevo – vzdálenosti mezi „střední elektrodou“ Obrázek vpravo – „otevřený“ kondenzátor. Převzato [10].....	10
Obr. 9	Pouzdro zajišťující symetrické elektrické pole. Převzato [10] .....	10
Obr. 10	Hodnoty kapacity C jako funkce vzdálenosti. Převzato [10].....	11
Obr. 11	Oblouky a jejich vzdálenosti jsou od středu ke krajům větší. Převzato [10]	11
Obr. 12	Blokové schéma kapacitního snímače. Převzato [10].....	11
Obr. 13	1 – pole snímače, 2 – „Aktivní plocha“. Převzato [10] .....	12
Obr. 14	Změřená rezonanční křivka.....	13
Obr. 15	Různé druhy feritových jader. Převzato [9] .....	14
Obr. 16	Ukázka nabídky „Instrument Manager“ .....	15
Obr. 17	Objekt „XY Trace“. Zobrazující změnu napětí a odporu v závislosti na čase. ....	16
Obr. 18	Schéma v programu VEE.....	17
Obr. 19	Vývojový diagram pro měření indukčním senzorem.....	18
Obr. 20	Vlevo indukční senzor a vpravo senzor zapojený jako LC článek. ....	19
Obr. 21	Přístroje použité při měření (horní: multimetr 34410A, dolní: generátor 33220A ) .....	19
Obr. 22	Přípevnění senzoru na rostlinu.....	20
Obr. 23	Detail teplotního čidla.....	20
Obr. 24	Graf naměřených hodnot, závislost čas/napětí.....	21
Obr. 25	Graf naměřených hodnot, závislost čas/odpor .....	21
Obr. 26	Graf naměřených hodnot 1 den.....	22



Obr. 27	Graf naměřených hodnot 2 den.....	22
Obr. 28	Graf naměřených hodnot 3 den.....	23
Obr. 29	Červený – průběh RC oscilátoru, černý – průběh komparátoru .....	23
Obr. 30	ATmega16 – 16PU a ATmega16 – 16AU. Převzato [16] .....	25
Obr. 31	Vývojový diagram hlavního programu .....	26
Obr. 32	Vývojové diagramy přerušení.....	26
Obr. 33	Realizace zařízení .....	28
Obr. 34	Realizace zařízení – usazení do boxu .....	28
Obr. 35	Uzavřené zařízení - měření .....	29
Obr. 36	Uzavřené zařízení – naměřená hodnota .....	29
Obr. 37	Deska plošných spojů .....	34
Obr. 38	Osazování deska plošných spojů .....	34
Obr. 39	Deska plošných spojů - senzor.....	35
Obr. 40	Schéma zapojení senzoru.....	36

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Relativní permeabilita některých materiálů .....	5
Tab. 2	Typy dielektrik a jejich vlastnosti. Převzato [5] .....	8
Tab. 3	Typy dielektrik a jejich vlastnosti. Převzato [6] .....	9
Tab. 4	Naměřené hodnoty kapacitním senzorem.....	27

# ÚVOD

Tato bakalářská práce zahrnuje problematiku měření proudění kapaliny u komplikovaných biologických struktur. Je zde popsán princip jednotlivých variant měření a vlastností metod.

Cílem této práce je navrhnout uspořádání senzoru a elektroniky pro zpracování signálu ze senzoru a následné realizování.

Biologické struktury, jako jsou například stromy, přijímají minerální látky pomocí vody a zároveň i k životu důležitou vodu.

Proudění vody v rostlinách se dá považovat za nejdůležitější fyziologický proces, protože je nezbytnou podmínkou v procesu fotosyntézy. Fotosyntéza, jak jistě většina lidí ví, je jedním z dějů, bez kterých by život stěží existoval. Je celá řada parametrů pomocí kterých lze proudění vody popsat. Osobně se zaměřím na transpirační proud.

Transpirační proud je proudění vody dřevinami a to od kořene k listům. Pomocí měření transpiračního proudu se dá zjistit zda-li je strom v pořádku nebo nikoliv. Je-li transpirační proud mnohem nižší než průměrná hodnota daného druhu (nezpůsobeno delším obdobím sucha), je pravděpodobné, že strom slábne a hrozí jeho pád. V takovém případě hrozí nebezpečí poškození hmotného majetku a především ohrožení osob, čemuž by se mohlo v čas zabránit a zachránit nejen lidský život.

# 1 METODY MĚŘENÍ

Cílem metod je zjistit velikost nebo určitou změnu. Metody měření se dělí na dvě hlavní kategorie destruktivní (méně šetrné k dřevnatému porostu) a nedestruktivní senzory (šetrnější). Destruktivní metody zasahují do kmene stromu proto jsou méně náchylné na rušivý faktor okolí. Aplikací čidla uvnitř dřeviny můžeme způsobit změny, které ovlivní průběh měření. Tento nechtěný jev u nedestruktivních senzorů odpadá. Hlavní zástupci nedestruktivních senzorů jsou indukční a kapacitní senzory.

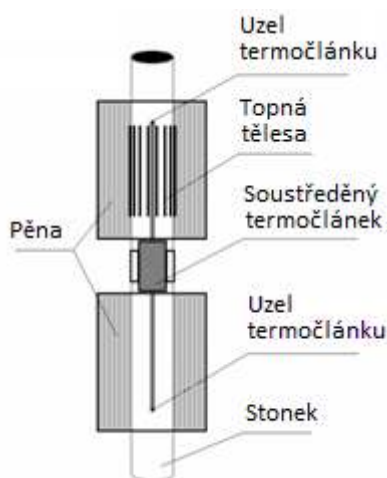
## 1.1 Destruktivní metody

Princip spočívá v aplikaci čidla tak, že se musí odstranit kůra nebo zasáhnout do kmene stromu. Již tento zásah je tak značný, že může ovlivnit celé měření. Strom se takovým zásahům brání vypouštěním pryskyřice. Měření transpiračního proudu je náročné na čas, takže ve většině případů zarůstají čidla do stromů. Čidlo které jednou zaroste není vhodné pro další měření, protože jeho vyjmutí by značně poranilo strom.

Ve většině se jedná o metody založené na různých variantách termodynamického principu. Mezi nejčastěji používané termodynamické metody patří metoda tepelné bilance (HBM) a tepelných pulsů (HPV). [1]

### 1.1.1 Metoda tepelné bilance (HBM)

Protože největší hodnota transpiračního proudu je uvnitř kmene, je kmen vhodným místem pro měření. Rychlost proudu je odvozena z pohybu tepelné vlny v krátkodobě zahřáté části kmene (Manual-Greenspan Technology 1999). [1]



Obr. 1 Schéma čidla metody tepelné bilance pro malé stonky. Převzato [1]

### 1.1.2 Metoda tepelného pulzu (HPV)

Protože největší transpirační proud prochází kmenem stromu, je vhodným místem pro měření. Kmen se lokálně krátkodobě zahřeje a rychlost proudu je odvozena z pohybu tepelné vlny. Metoda HPV do jisté míry zachycuje dynamiku změn rychlosti transpiračního proudu větví či jednotlivých stromů. [1]

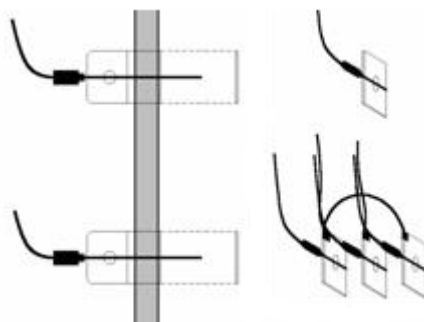
K měření transpiračního proudu metodou HPV se používá systém Sapflow Meter SF300.



Obr. 2 Aplikace systému Sapflow Meter SF300. Převzato [13]

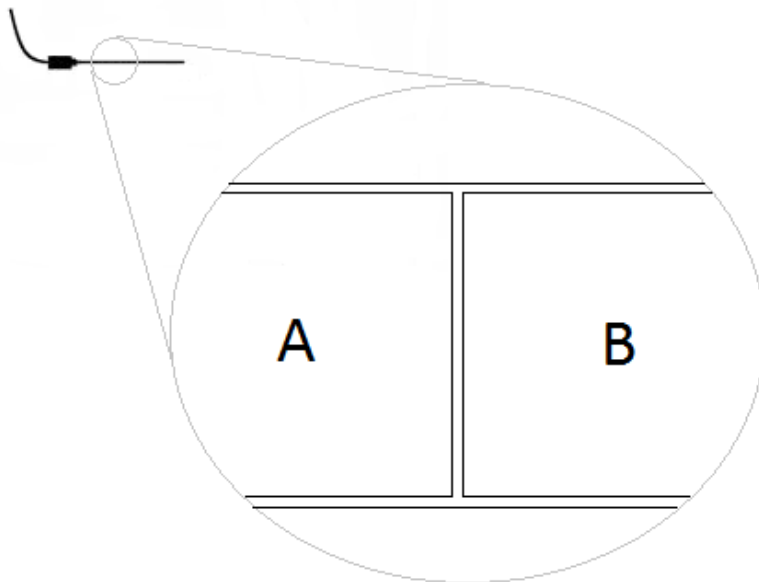
### 1.1.3 Metoda tepelné bilance kmene s přímým elektrickým ohřevem pletiv a vnitřním měřením teploty (THB)

Metoda založená na principu, že lokální místo kmene je zahříváno a současně prouděním ochlazováno. Teplo je uvolňováno uvnitř kmene rovnoměrně. Menší část tepla (cca 10 – 20 %) je odváděna pomocí pletiv a větší část pomocí transpiračních proudů. [1]

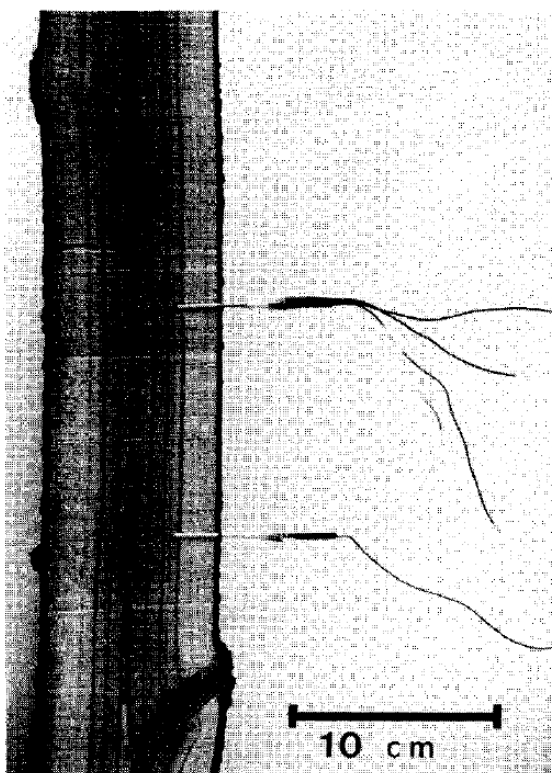


Obr. 3 Uspořádání tenkých nerezových elektrod v nichž jsou zavedeny série termočlánků aplikované do kmene. Převzato z [1]

Pro lepší výsledky se používají vícebodová termočidla. Princip spočívá v aplikaci více termočlánků do jednoho čidla (jehlice). S rostoucím počtem termočlánků roste délka jehlice. V jedné jehlici může být například 8 termočlánků, takže dostáváme 8 hodnot v různých hloubkách kmene. Což je značná výhoda.



Obr. 4 Detail vícebodové jehlice s více termočlánky označenými A a B



Obr. 5 Podélný řez kmenem Douglaské jedle s aplikací dvou čidel. Převzato [14]

## 1.2 Nedestruktivní metody

Princip metody je nezasahovat do částí dřevit, umístit senzor mimo strom a pomocí pole (například: magnetického) měřit transpirační proud. Jsou šetrnější k měřenému objektu, protože nezasahují destruktivně do jeho části. Jejich instalace není tak složitá a snadno se odebírají, tedy je možné použití pro více měření. Jelikož senzor měří změnu pole, je více náchylný na okolní rušení. Proto nedestruktivní metody mohou mít vyšší chybovost než metody destruktivní.

### 1.2.1 Indukční metoda

Princip spočívá v použití cívky (induktoru). Cívkou protéká střídavý proud a vytváří magnetické pole, které postupuje dále do prostoru. Pro zvýšení indukčnosti cívky se používají feritová jádra. Směr šíření magnetického pole závisí na typu použitého feritu. Například při použití půlky feritového hrníčku, magnetické pole se šíří otevřenou stranou feritu. Pokud se vloží do magnetického pole předmět z elektricky vodivého materiálu dojde k deformaci magnetického pole. Jelikož magnetické pole vzniká kolem celé cívky je za potřeby odstínit (např. hrníčkový ferit), pokud není odstíněné je měření náchylné na chyby. Pokud měříme dlouhodobě strom v lese může měření ovlivnit zvěř, voda kapající z listů i pouzří mravenci. Měření může ovlivnit i samotný měřicí přístroj při nevhodném umístění.

Relativní permeabilita je vlastnost prostředí látky zeslabovat nebo zesilovat magnetické pole. Z tohoto hlediska dělíme látky do tří skupin:

$\mu_r < 1$  permeabilita o trochu menší než 1 (diamagnetické)

$\mu_r > 1$  permeabilita o trochu větší než 1 (paramagnetické)

$\mu_r \gg 1$  permeabilita daleko větší než 1 (feromagnetické)

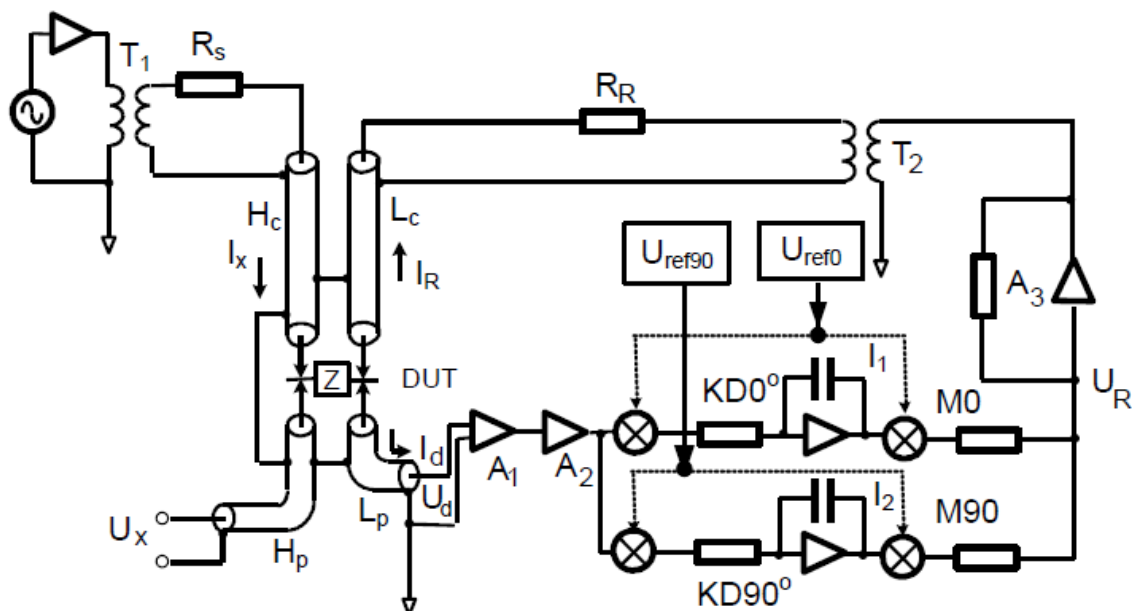
Tab. 1 Relativní permeabilita některých materiálů

Materiál	$\mu_r$
Hliník	1,000 023
Kapalný kyslík	1,003 620
Kobalt	80 – 200
Měď	0,999 990
Permalloy	50 000 – 140 000
Platina	1,000 264
Železo	300 - 10 000
Plynný kyslík	1,000 001 86
Voda	0,999 991

### 1.2.1.1 Číslicové měřiče impedancí

Z celé řady možností číslicového měření impedancí je vhodná metoda automaticky vyvažovaných můstků. Pro přesnost těchto metod má základní význam vyloučení vlivu parazitních impedancí uchycení (držáku) měřeného objektu (DUT - Device Under Test) na panelu přístroje a příp. přívodů k DUT. Jelikož se zde užívá měření složek fázoru napětí metodou koherentní demodulace, má přesnost a stálost fáze referenčních napětí použitých koherentních demodulátorů zásadní význam. [4]

Zjednodušené zapojení automaticky vyvažovaného můstku („elektronický můstek“) na obr. 3 zobrazuje podrobněji zejména připojení DUT upravenou čtyřsvorkovou metodou [3]. Proud  $I_x$  z můstkového zdroje protéká vnitřním odporem zdroje  $R_s$ , středním vodičem koaxiálního kabelu  $H_c$ , DUT,  $L_c$ , referenčním odporem  $R_R$  a vrací se po pláštích  $H_c$ ,  $L_c$  zpět k můstkovému zdroji. Jde o záměrné paralelní uspořádání přívodů tak, aby proudy středními vodiči i plášti měly navzájem opačný směr s cílem dosáhnout minimální hodnoty magnetického pole a tedy i minimální vzájemné indukčnosti mezi přívody k DUT. [4]



Obr. 6 Princip elektronicky vyvažovaného můstku pro měření impedancí. Převzato [4]

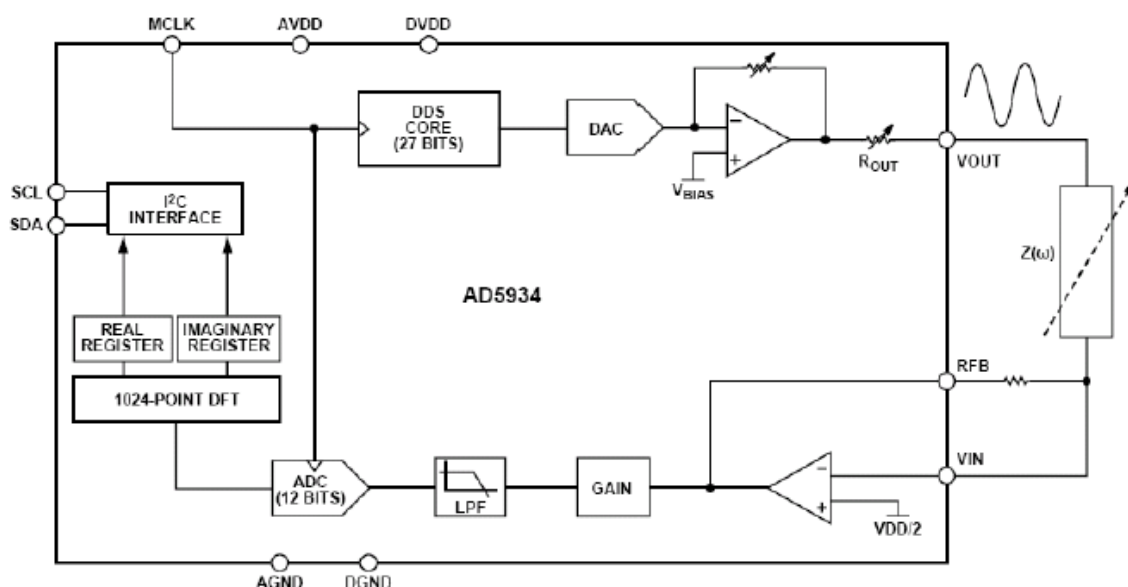
Transformátory  $T_1$  a  $T_2$  slouží k oddělení stejnosměrného napětí připojovaného na DUT např. při měření závislosti kapacity na napětí u polovodičových součástek. Vstupní napětí  $A_1$  vyvolané proudem  $I_D$  je příznakem nerovnováhy elektronického můstku a po úpravách slouží ke generaci vyvažovacího napětí na sekundáru  $T_2$ . Výsledkem je dosažení rovnováhy, tj.  $I_D = 0$  a  $I_X = I_R$ . Při rovnováze je také hodnota vzájemné indukčnosti mezi přívody ideálně nulová. [4]

Při harmonickém průběhu napájení rovnováha znamená rovnost fázorů  $I_X$  a  $I_R$ , které lze dosáhnout pouze za předpokladu, že lze měnit obě složky fázoru  $I_R$ . K tomu slouží dva koherentní demodulátory spínacího typu s referenčními napětími vzájemně posunutými o  $90^\circ$ , které provádějí rozklad napětí nerovnováhy na reálnou a

imaginární složku. Použití koherentních demodulátorů současně dovoluje regenerovat signál k vyvažování i při hodnotách  $I_D$  ležících pod úrovni šumu. [4]

### 1.2.1.2 Měření impedance integrovaným obvodem AD5934

Koncepce obvodu je založena na koherentním zpracování, takže dovoluje měření i při nízkých úrovních signálu. Z číslicového generátoru signálu, realizovaného metodou DDS, jsou odvozeny dvě ortogonální harmonické referenční napětí použité pro výpočet první harmonické proudu impedancí algoritmem DFT. [4]



Obr. 7 Impedanční konvertor AD5934–blokové schéma. Převzato [4]

V případě nelineární impedance, tj. s hodnotou závislou na přiloženém napětí, je impedance definována nejčastěji jako podíl prvních harmonických napětí a proudu. Jedna z možností je výpočet první harmonické proudu po digitalizaci signálu číslicovou Fourierovou transformací [5].

Vztahy pro výpočet složek první harmonické Fourierovou transformací:

$$a_1 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T i(t) \cos \omega t dt, \quad b_1 = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T i(t) \sin \omega t dt \quad . [5]$$

Jsou v podstatě ekvivalentní procesu koherentní demodulace, jelikož jde o násobení proudu  $i(t)$  referenčními průběhy  $\sin \omega t$  a  $\cos \omega t$  co , odvozenými ze zdroje pracovního napětí. [4]



### 1.2.2 Kapacitní metoda

Kapacitní snímače reagují na změnu kapacity, která se vyvolá přiblížením předmětu. Výhodou je, že reagují téměř všechny materiály, od kovů až po oleje. Kapacitní snímač je také schopný „vidět skrz“ nekovové materiály. Klasickým příkladem je detektor výšky hladiny. [8]

Měřená část stromu se umístí mezi dvě elektrody, dřevo tedy tvoří dielektrikum. Transpirační proudění ovlivňuje kapacitu. Tato citlivost je definována jako změna kapacity  $\Delta C$ , při které se mění signál na výstupu senzoru.

Vlastnosti dřeva jako dielektrika popisujeme dielektrickými veličinami – relativní permitivitou  $\epsilon'$ , ztrátovým činitelem  $\tan \delta$  a ztrátovým číslem  $\epsilon''$ . [15]

Dielektrické vlastnosti dřeva obvykle zjišťujeme při aplikaci střídavého proudu, kde sledujeme fázový posun napětí a proudu mezi elektrodami a kondenzátorem ze dřeva. Uvažujeme-li ideální kondenzátor zapojený v okruhu střídavého proudu, předbíhá proud napětí o  $\pi/2$ . Po vložení dielektrika – dřeva – do pole kondenzátoru nastává jeho polarizace a fázový posun mezi proudem a napětím se změní o ztrátový úhel  $\delta$ . [15]

Tab. 2 Typy dielektrik a jejich vlastnosti. Převzato [5]

typ dielektrika	rozsah kapacit	max. napětí (V)	přesnost	svodový proud
slída	1pF - 10nF	100 - 1000	dobrá	malý
keramika	0,5pF - 1nF	100 - 2000	dobrá	malý
BaTiO <sub>3</sub> keramika	10pF - 1μF	40 - 30000	špatná	středně velký
polyester	1nF - 50μF	50 - 1000	dobrá	malý
polystyren	10pF - 2,7μF	100 - 600	výborná	velmi malý
polykarbonát	100pF - 30μF	50 - 800	výborná	malý
polypropylen	100pF - 50μF	100 - 800	výborná	velmi malý
teflon	1nF - 2μF	50 - 200	výborná	nejmenší
sklo	10pF - 1nF	100 - 1000	dobrá	velmi malý
Ta - elektrolit	0,1μF - 500μF	3 - 100	špatná	střední
Al - elektrolit	0,1μF - 2F	3 - 600	velmi špatná	velmi velký
dvouvrstvý elyt.	0,1F - 10F	1,5 - 6	špatná	malý
olej	0,1μF - 20μF	200 - 20000	střední	malý
vakuum (N <sub>2</sub> )	1pF - 5nF	2000 - 50000	dobrá	velmi malý
porcelán	100pF - 0,1μF	50 - 500	dobrá	malý
metaliz. Papír	1nF - 50μF	100 - 1000	střední	malý

Jmenovitá kapacita (uvedena přímo na pouzdře) a její tolerance - vzhledem k tolerancím při výrobě se kondenzátory vyrábějí s dosti velkou tolerancí (obvykle +20 % a více, nejsou výjimky ani -30 +50 %). Kdysi dávno ve výrobě Tesly řady TE98x byla zaručena tolerance přímo z linky -5 až +95 %. O trochu větší střední kapacitou z výroby si slušný výrobce ponechává rezervu na stárnutí, doformovávání v provozu apod. [7]

Jmenovité a maximální napětí (bývá přímo na pouzdře) - je to napětí, obvykle součet stejnosměrné a střídavé složky, které nesmí být v provozu překročeno. Jsou-li uváděny 2 údaje - třeba 400/450V, bývá vyšší hodnota uváděna pro specifické podmínky, a je definována v katalogovém listu. Obvykle se jedná o krátkodobý provoz, přepětí při náběhu zdroje, součet určitého typu zvlnění apod. [7]

Pracovní rozsah teplot (uveden na pouzdře, většinou jen horní mez) - teplota okolí, v jejímž rozmezí je dovoleno kondenzátor používat a ve kterém zůstávají všechny parametry kondenzátoru v mezích, stanovených katalogovým listem. Při velmi nízkých teplotách se snižuje kapacita a zvyšuje vnitřní odpor (elektrolyt mrzne), při provozu nad dovolenou teplotou dochází k vysychání elektrolytu a prudkému zkrácení životnosti. [7]

Tab. 3 Typy dielektrik a jejich vlastnosti. Převzato [6]

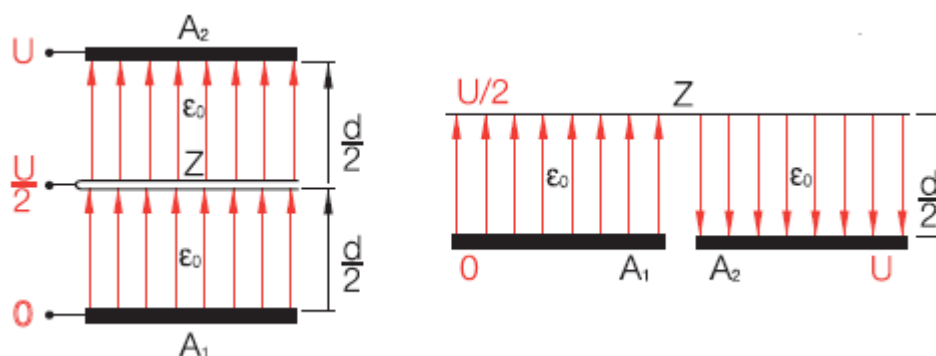
Dielektrikum	$\epsilon_r$	Poznámka
Balza	1,4	
Dřevo	2,04 - 7,3	Podle druhu dřeva
Germanium	16 - 16,4	Ge
Jantar	2,6 - 2,8	
Kondenzátorový papír	2,5 - 2,55	
Křemen tavený	3,8	
Křemík	11,7	
Led	4,8	
LiF (monokrystal)	9,0	
Mramor	40762,0	
NaCl (monokrystal)	5,9	Sůl kuchyňská
Plexisklo	3,4	
Polystyrén pěnový	1,03	
Porcelán	5,5 - 6,5	
Síra krystalická	3,75 - 4,45	Podle orientace
Sklo	3,8 - 19	Podle druhu skla
Slída	6,9 - 11,5	
Teflon	2,1	
Vakuum	1	
Voda	81	20 °C
Vzduch	1,00059	

Důležitou podmínkou správné a dlouhodobé činnosti elektrolytického kondenzátoru je okolní teplota. Dá se říci, že ze všech ostatních pracovních podmínek jmenovité napětí, proud zvlnění, kmitočet procházejícího střídavého proudu a mech. namáhání má na spolehlivost a životnost kondenzátoru největší vliv. Při každém snížení pracovní teploty kondenzátoru o 7 - 10 °C stoupá jeho životnost přibližně na dvojnásobek. Je proto velmi vhodné kondenzátory montovat na takové místo a takovým

způsobem, aby nemohlo dojít k jeho zbytečnému ohřívání. [7]

### 1.2.2.1 Kapacitní snímače

Snímací elektroda a její vlastnosti mohou být postupně vysvětleny odvozením z jejího geometrického tvaru. Rozptylová pole na hranách destiček mohou být pro tento účel zanedbána. Uprostřed mezi dvěma kruhovými destičkami  $A_1$  a  $A_2$  je ve vzdálenosti  $d/2$  vložena dobře vodivá „střední elektroda“  $Z$  s tloušťkou  $d \rightarrow 0$ . Působením napětí mezi  $A_1$  a  $A_2$  se vytvoří elektrické pole. To vytvoří na elektrodě  $Z$  napětí  $U/2$ . „Střední elektroda“ proto převezme funkci další destičky. Kondenzátor se pak elektricky i geometricky chová stejně jako dva do série zapojené kondenzátory. Jestliže se tyto kondenzátory rozloží vedle sebe, destičky  $A_1$  a  $A_2$  budou ležet ve stejné výši a „střední elektroda“  $Z$  bude ve vzdálenosti  $d/2$ . Výsledkem je „otevřený“ kondenzátor a pole v polovinách kondenzátorů mají opačný směr. [10]

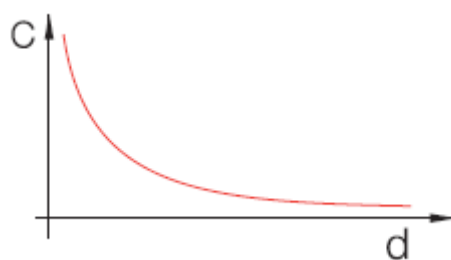


Obr. 8 Obrázek vlevo – vzdálenosti mezi „střední elektrodou“ Obrázek vpravo – „otevřený“ kondenzátor. Převzato [10]

V kapacitních snímačích je jako snímací prvek používán tento „otevřený kondenzátor“. Destička  $A_2$  má však tvar kruhové elektrody (pouzdro) soustředné okolo  $A_1$  tak, aby vzniklo symetrické elektrické pole a „střední elektroda“ je snímaný prvek. Aktivní plocha tohoto snímače odpovídá kruhové elektrodě  $A_2$ . Vzorec pro výpočet kapacity zůstává – za výše definovaných předpokladů – v platnosti i pro kondenzátor tohoto tvaru. [10]

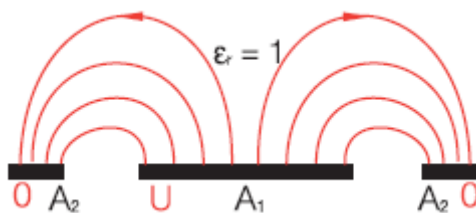


Obr. 9 Pouzdro zajišťující symetrické elektrické pole. Převzato [10]



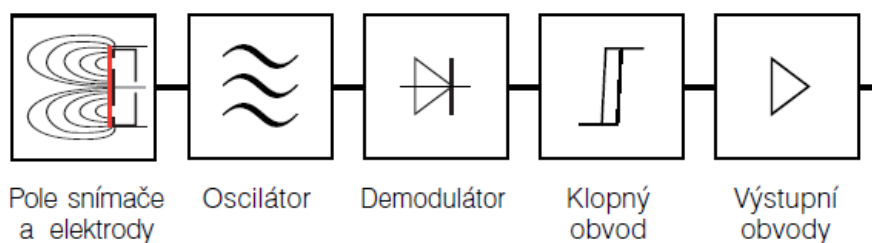
Obr. 10 Hodnoty kapacity  $C$  jako funkce vzdálenosti. Převzato [10]

Nevodivé materiály (plast, sklo a také kapaliny) mohou být snímány kapacitními snímači, pokud je  $\epsilon_r$  podstatně větší než  $\epsilon_0$ . Dosavadní úvahy spočívaly v tom, že se siločáry uzavírají snímaným prvkem cestou nejmenšího odporu. Jestliže snímaný prvek ( $d \rightarrow \infty$ ;  $\epsilon_r = 1$ ,  $C \rightarrow 0$ ) chybí, uzavírají se obloukem od středu ke kruhové elektrodě. Cesta nejmenšího odporu je také částečně závislá na vlivu odpuzujících se, stejným směrem orientovaných siločar. [10]



Obr. 11 Oblouky a jejich vzdálenosti jsou od středu ke krajům větší. Převzato [10]

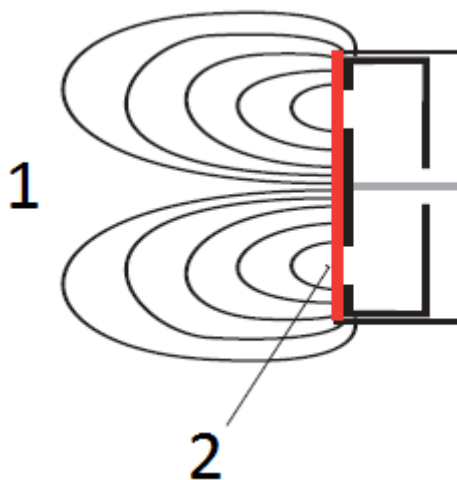
Jestliže elektricky nevodivé snímané prvky vstupují do pole snímače, kapacita se mění v závislosti na  $\epsilon_r$  a na hloubce vnoření resp. na vzdálenosti k aktivní ploše. Nikdy však není větší než kapacita kovu. [10]



Obr. 12 Blokové schéma kapacitního snímače. Převzato [10]

Aktivní plocha je oblast, kterou vstupuje vysokofrekvenční pole snímače do

vzduchové mezery. Je to v první řadě čelní plocha povrchu snímače a odpovídá přibližně povrchu vnější elektrody snímače [10]



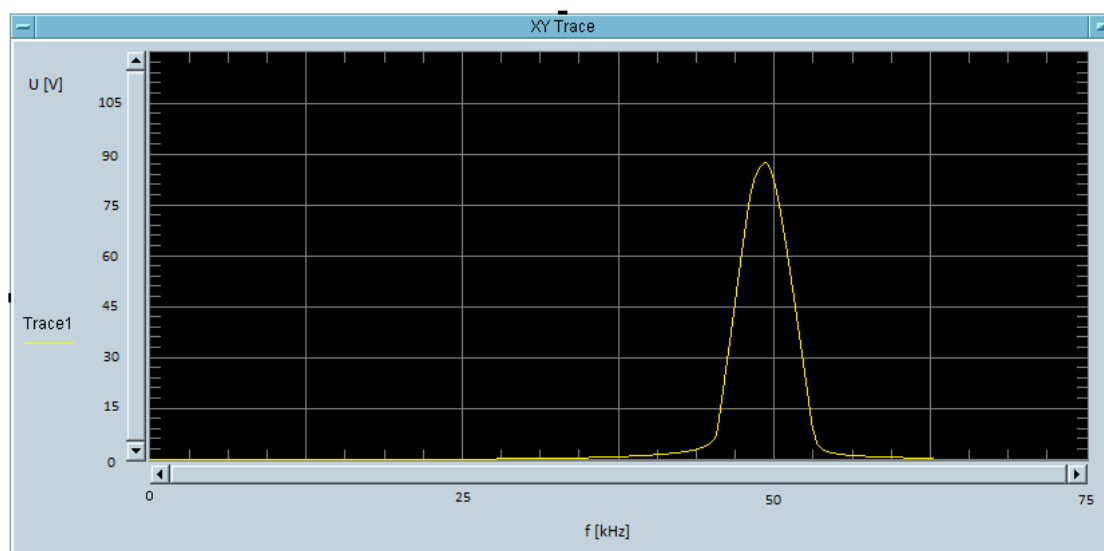
Obr. 13 1 – pole snímače, 2 – „Aktivní plocha“. Převzato [10]

## 2 NÁVRH SENZORU

Návrh indukčního senzoru tvoří popis indukčních senzorů, program a popis schématu.

Princip spočívá v použití cívky. Cívka je vodič (nejvhodněji měděný) navinutý na izolační nosnou vrstvu. Vodič musí být pokrytý vrstvou laku, aby nedocházelo ke zkratu. Kolem cívky vzniká magnetické pole. Pro zvětšení magnetických vlastností se dovnitř cívky vkládá jádro z magneticky měkké oceli (feromagnetická látka).

Změna transpiračního proudu ovlivňuje permeabilitu, tedy vyvolá změnu magnetického pole. Ta se projeví na indukci cívky. Tato změna je nepatrná proto k cívce do série umístíme kondenzátor tak vznikne sériový rezonanční obvod. Frekvenci zvolíme takovou abychom se dostali na bok rezonanční křivky.



Obr. 14 Změřená rezonanční křivka

I při malé změně transpiračního proudu dochází k výraznější změně napětí, toto naladění postačí k tomu abychom byli schopní změnu transpiračního proudu zaznamenávat.

Abychom nemuseli používat cívky o mnoho závitů, používáme feritová jádra. Feritová jádra ovlivňují tok magnetického pole. Pomocí vhodného feritového jádra můžeme nasměrovat magnetický tok. Magnetické pole se uzavírá do tzv. „smyček“, tyto smyčky uzavírají tok magnetického pole. Magnetické pole se znázorňuje pomocí siločar.



Obr. 15    Různé druhy feritových jader. Převzato [9]

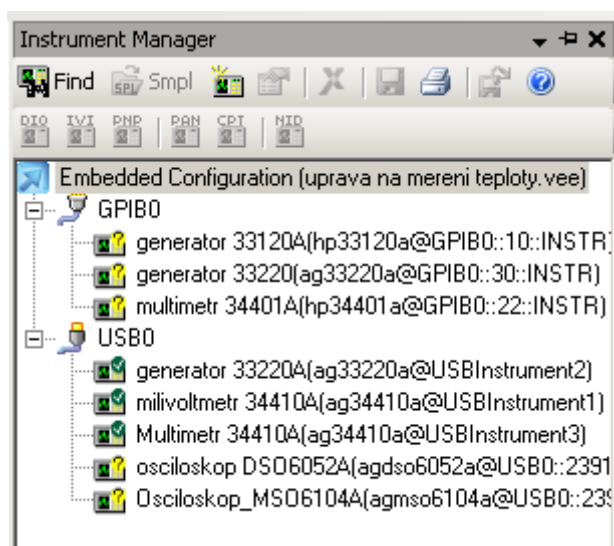
## 2.1 Návrh programu

Za tímto účelem byl vybrán program Agilent VEE.

### 2.1.1 VEE

Jedná se o program využívající vyšší programovací jazyk s grafickým zobrazení připomínající vývojový diagram. Toto objektové programování je přehledné, vhodné i pro začátečníka.

Program slouží jako zprostředkovatel při komunikaci měřících přístrojů a počítače. Komunikace přístrojů je možná pomocí GPIB, GPIO, USB, LAN nebo VXI. Název připojeného přístroje se přidělí automaticky, ale pro snadnější práci si uživatel může přístroje přejmenovat. V záložce „Instrument Manager“ jsou všechny přístroje připojené k počítači. [2]



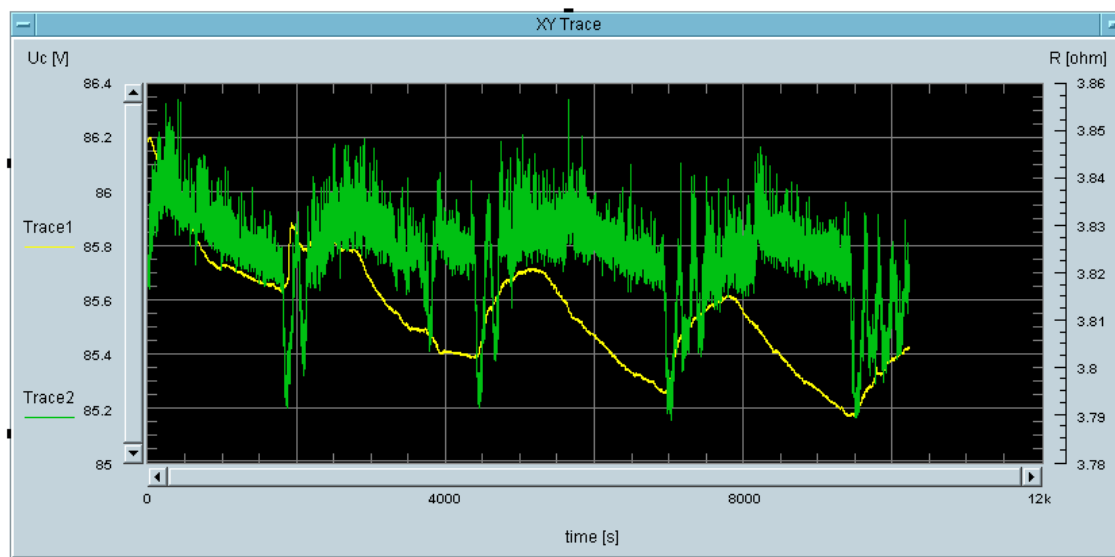
Obr. 16 Ukázka nabídky „Instrument Manager“

Program obsahuje mnoho programovacích objektů a knihoven pro jednodušší práci. Pro jejich množství budou popsány pouze prvky použité v programu pro měření. Základním objektem je objekt „Start“.

„Start“ je tlačítko, sloužící k zahájení měření. Z něhož se odvíjí další fáze programu. „Text“ objekt do kterého je možno vpisovat příkazy nebo hodnoty. „Formula“ objekt obsahující vstupní a výstupní piny. Používá se po zápis funkcí nejčastěji ve spolupráci s objektem „Text“. Objekt „Formula“ přičte hodnotu kterou má na vstupním pinu A. Na pinu A je hodnota zapsaná v objektu „Text“. Spojení objektů se provede kliknutím na černý obdélníček a následným kliknutím na černý obdélníček druhého objektu. Viz. Obr. 9. Důležitým prvkem je objekt „Direct I/O“. Jeho hlavní úloha je komunikace s přístroji. Přijímá a posílá patřičná data k přístrojům. Obsahuje vstupní a výstupní piny. Aktivace objektu se provádí přivedením aktivizačního impulsu na pin. Objekt „Until Break“ je druh cyklu, který se opakuje pořád dokola. Aby nedošlo k zacyklení musí se použít objekt „Break“, který cyklus zastaví. Vyžadováno je



opakované měření proto byl použit objekt „Delay“. Do něhož se zapíše doba za kterou se má úkon opakovat. Při měření tohoto typu je nevhodné předem určit dobu měření. Výhodou je mít volbu okamžitého zastavení měření, proto byl do programu vložen objekt „STOP“. Jedná se o objekt tlačítko po jehož zmáčknutí dojde k ukončení programu. Zde byl použit jako aktivátor objektu „Break“, tady po jeho stisknutí se zastaví opakování cyklu „Until Break“. Z důvodu časově náročného měření (dny, týdny i déle) byla do programu vložena komponenta zobrazující průběh měření v grafu „XY Trace“.

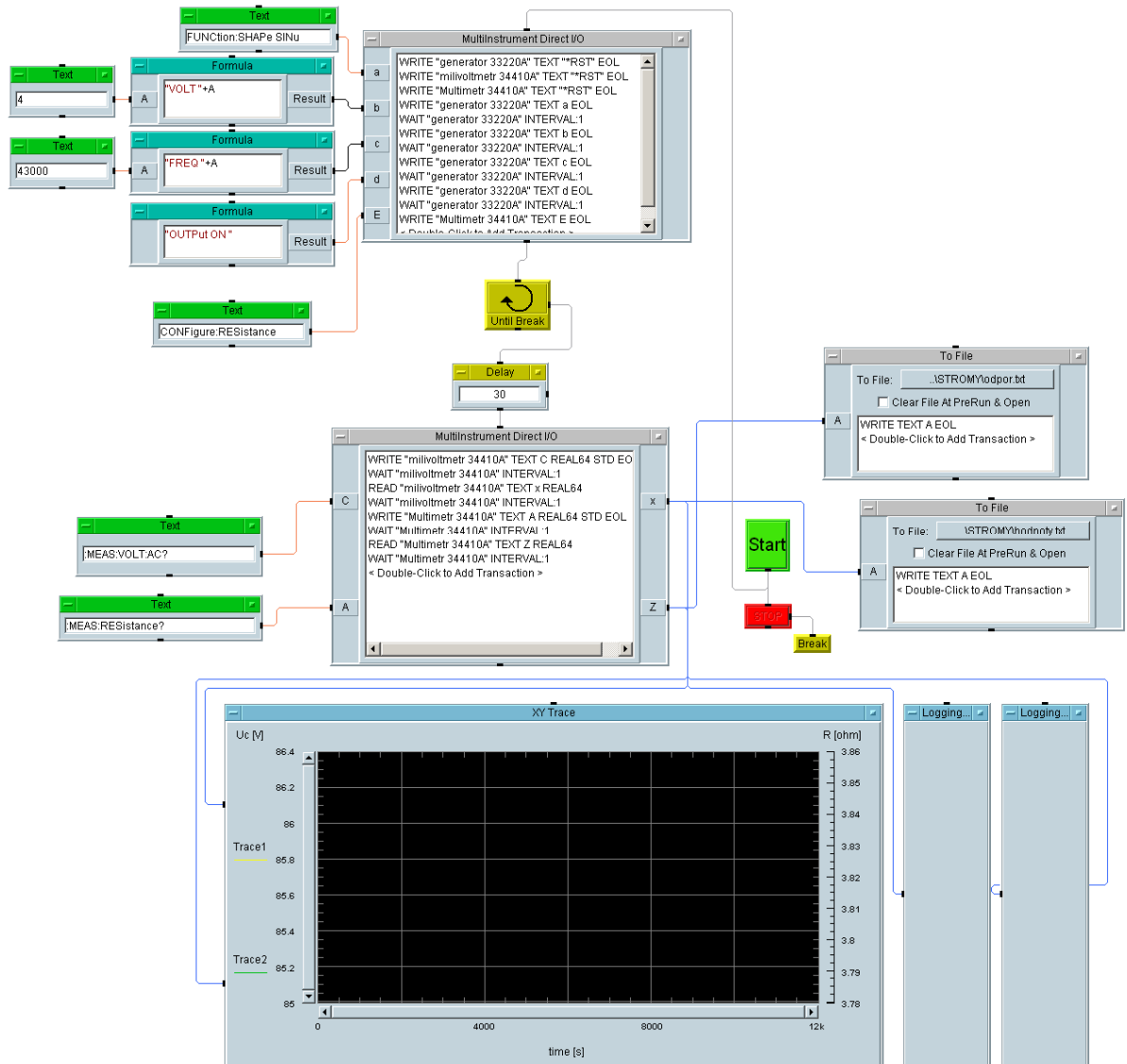


Obr. 17 Objekt „XY Trace“. Zobrazující změnu napětí a odporu v závislosti na čase.

Poslední důležitou částí je uložení naměřených hodnot do souboru, pro další práci. K tomu slouží objekt „To File“. V něm se nastaví cesta k souboru do kterého se budou hodnoty ukládat.

Toto jsou základní objekty v programu pro měření pomocí indukčního senzoru. Je navržen tak, aby nastavil přístroje a následně v časovém intervalu měřil a zaznamenával veličinu (napětí) do poznámkového bloku. Práce s grafy v programu VEE je značně omezená. Následně se hodnoty mohou zpracovat např. v programu Excel.

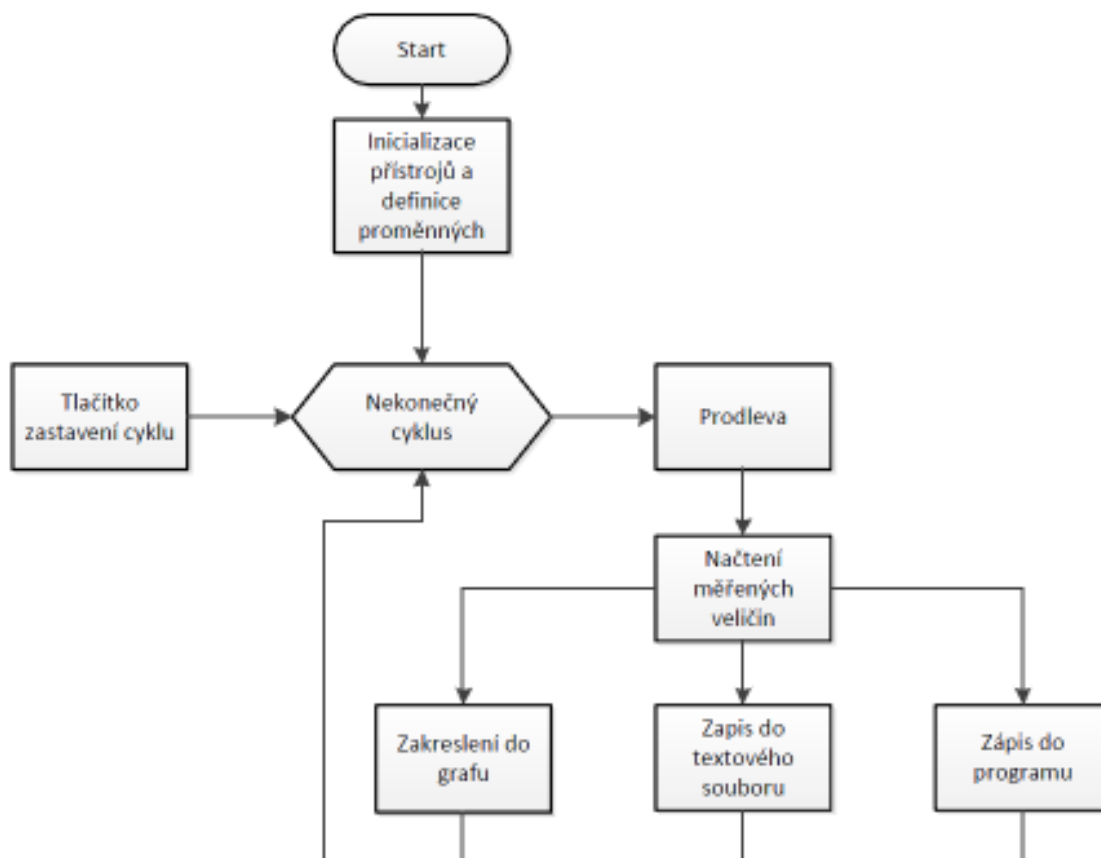
## 2.2 Schéma programu



Obr. 18 Schéma v programu VEE

Výše uvedené schéma je funkční (již použité při prvních měřeních). Měření se spouští tlačítkem start. Dále putuje spouštěcí impuls na direct I/O, kde se nastaví měřící přístroje (frekvence, amplituda, tvar amplitudy a zapnutí výstupu). Dále je aktivován cyklus until break a objekt delay. Delay posílá každých 30 sekund spouštěcí povel objektu direct I/O. Zde se nastavují přístroje tak, aby odečetly hodnoty. Následně se hodnoty zapisují do textového souboru, zakreslují do připraveného grafu a vypisují na obrazovce.

## 2.3 Vývojový diagram programu



Obr. 19 Vývojový diagram pro měření indukčním senzorem

Po startu programu jsou přístrojům přiřazeny příslušné parametry a zvolené veličiny vhodné pro měření. Po dokončení těchto příprav následuje cyklus, který se opakuje dokud se stiskne tlačítko nebo pokud dojde k zaplnění paměti počítače. Následuje prodleva programu, která je vhodná při opakování, protože přístroje potřebují nějaký čas pro načtení hodnot a bez prodlevy by došlo k jejich zahlcení. Tato prodleva má další důležitý význam a to, že pomocí ní nastavujeme dobu, po které se má opakovat měření. Následuje načtení měřených hodnot a jejich uložení. Uložení probíhá v přímém zakreslení do grafu v prostředí programu, výpis veličin v prostředí programu a uložení do textového souboru. Uložení do textového souboru se provádí z důvodu lepšího znázornění v grafu a také, protože hodnoty zobrazené v programu nejdou přemístit a s interním grafem lze provádět pouze základní úpravy. Již zmíněné grafy jsou uvedené v následující kapitole.

### 3 REALIZACE SENZORU

Bylo vyzkoušeno obou typů nedestruktivních senzorů.

#### 3.1 Induktivní senzor

Měření bylo uskutečněno za účelem osvojení řešené problematiky a úvodem k problematice z praktického hlediska. Byl použit ferit tvaru „E“ který procházel cívkou tvořenou 550 závitů. Cívka (senzor) dále byla zapojena do sériového rezonančního obvodu s kondenzátorem. Tento vzniklý rezonanční obvod byl připojen ke generátoru a multimetru firmy Agilent. Tyto přístroje jsou zapojené pomocí rozhraní USB k počítači pro další zpracování dat. V počítači byl použit již zmíněný program. Senzor se umístil na pokojovou rostlinu. Nastavila se frekvence na bok rezonanční křivky, aby při malé změně kmitočtu docházelo k velké změně napětí. Měření probíhalo opakovaně v uzavřené laboratoři po dobu několika dní.



Obr. 20 Vlevo indukční senzor a vpravo senzor zapojený jako LC článek.



Obr. 21 Přístroje použité při měření (horní: multimetr 34410A, dolní: generátor 33220A )



Obr. 22 Připevnění senzoru na rostlinu

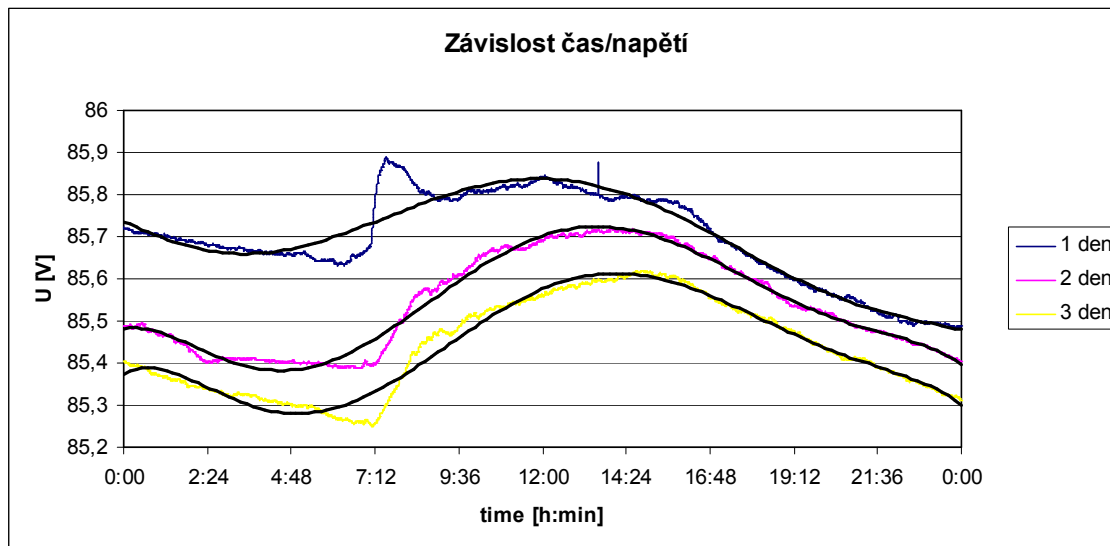
Z důvodu možné závislosti na teplotě byla v okolí senzoru měřena i teplota.



Obr. 23 Detail teplotního čidla

### 3.1.1 Výsledky měření

Měření bylo provedené tři po sobě jdoucí dny a to opakovaně na pokojové rostlině v období listopad – prosinec 2011.

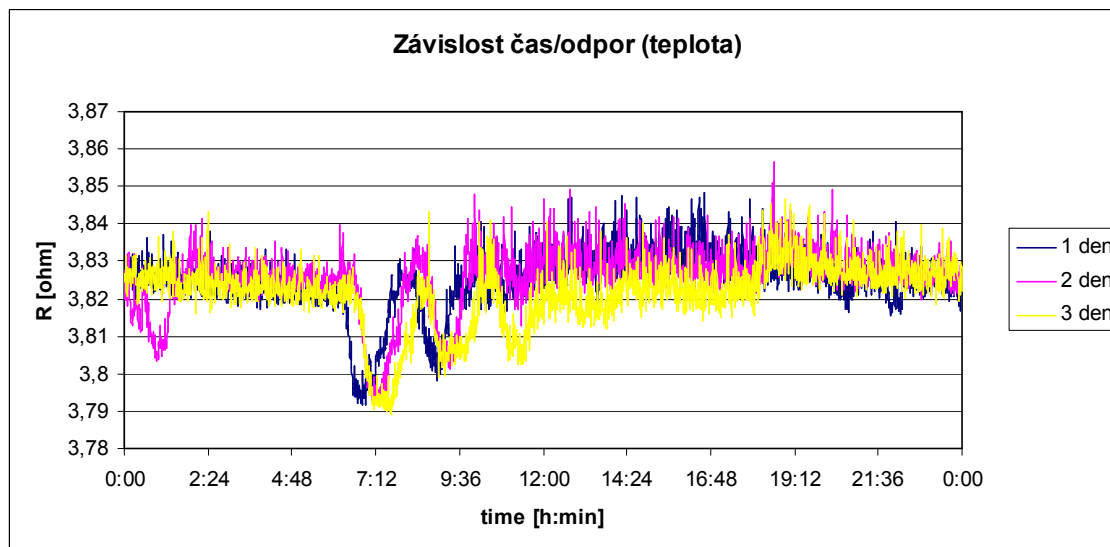


Obr. 24 Graf naměřených hodnot, závislost čas/napětí

Tvar grafů připomíná průběh transpiračního proudu a časově odpovídá jednotlivým fázím dne.

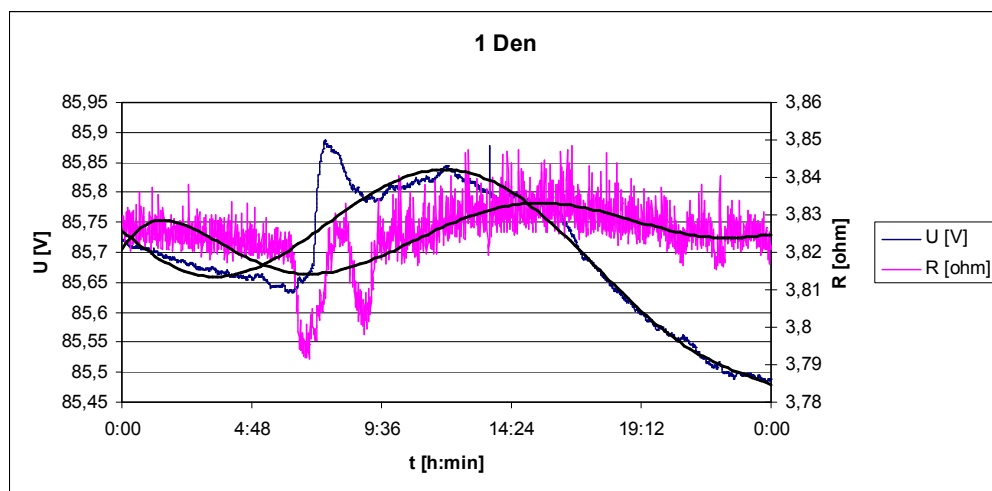
Střed rezonanční křivky byl  $f_{\text{rez}} = 47 \text{ kHz}$  při  $U_{\text{rez}} = 89,6 \text{ V}$  a zvolená frekvence pro měření  $f = 45,7 \text{ kHz}$ . Jelikož se naměřené hodnoty pohybovaly pouze v desetinách Voltu, je zapotřebí vzít v úvahu vliv teploty.

Při měření teploty se program modifikoval o další měřicí přístroj, který zaznamenával změnu odporu vlivem teploty.

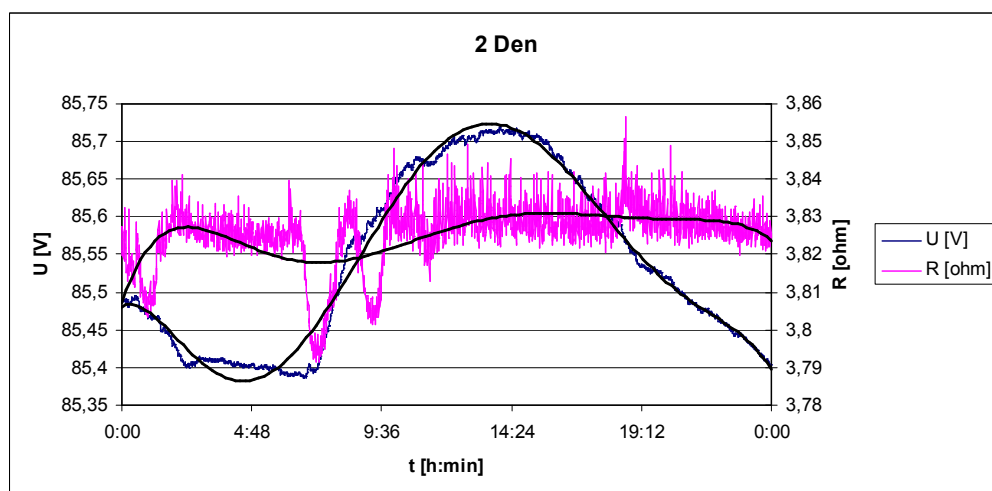


Obr. 25 Graf naměřených hodnot, závislost čas/odpor

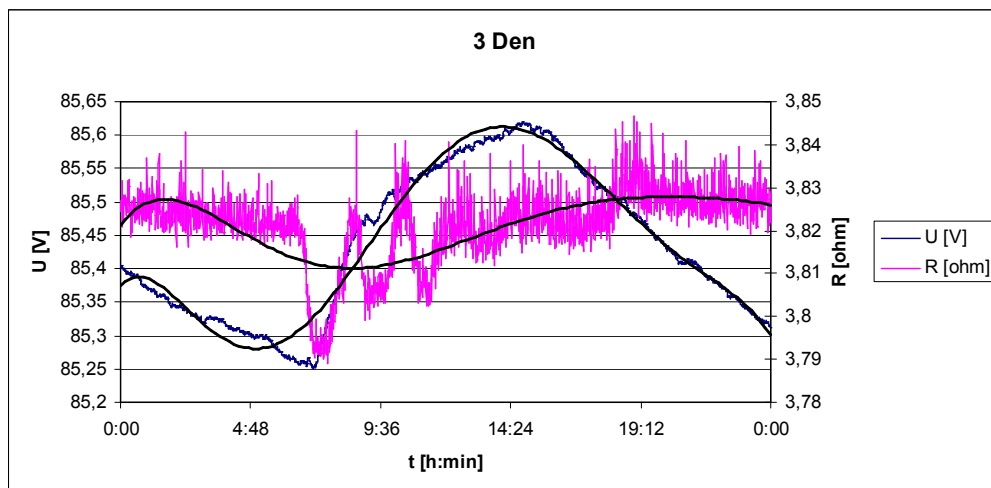
Znázornění změny teploty po dobu měření. Téměř stejné průběhy opakující se po 24 hodinách. Následuje pro lepší přehlednost zobrazení každého dne zvlášť.



Obr. 26 Graf naměřených hodnot 1 den



Obr. 27 Graf naměřených hodnot 2 den



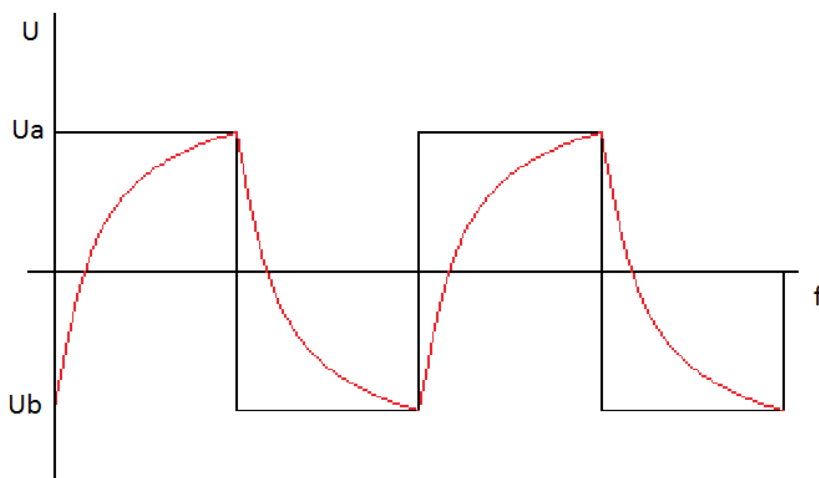
Obr. 28 Graf naměřených hodnot 3 den

Z uvedených grafů vyplývá, že existuje jistá korelace mezi změnou magnetického pole a změnou teploty. Naměřené hodnoty při dalších pokusech jsou podobné, je možné že měření ovlivnilo:

Jelikož bylo měření prováděné v zimě, nemusela měřená rostlina transpirovat. Vzhledem k průměru stonku 20 – 30 mm nemusí být velikost transpiračního proudu dostatečná pro zachycení senzorem.

### 3.2 Kapacitní senzor

Při zpracování dat ze senzoru byl použit mikrokontrolér ATmega16. Pro takt procesoru je použit externí komparátor o frekvenci 16 MHz. U mikrokontroléru je použit interní komparátor, který přijímá signál z RC oscilátoru a v závislosti na jeho úrovni překlápí. Na druhý vstup komparátoru je přivedené konstantní napětí. Pin PB7 (SCK) je nastaven jako výstupní a tvoří zpětnou vazbu RC oscilátoru.



Obr. 29 Červený – průběh RC oscilátoru, černý – průběh komparátoru



Pro výpočet frekvence u RC oscilátoru platí:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Tento vztah upravíme tak, aby vyjadřoval kapacitu, tedy:

$$C = \frac{1}{2\pi fR}$$

Hodnota rezistoru je  $R = 10 \text{ k}\Omega$ . Hodnota kondenzátoru  $C$  je tvořena dvěma parametry. První je kapacita kondenzátoru  $C_1 = 220 \text{ pF}$  a druhá neznámá kapacita senzoru označena jako  $C_2$ .

Matematické vyjádření výpočtu hledané kapacity senzoru:

$$C_2 = C - C_1$$

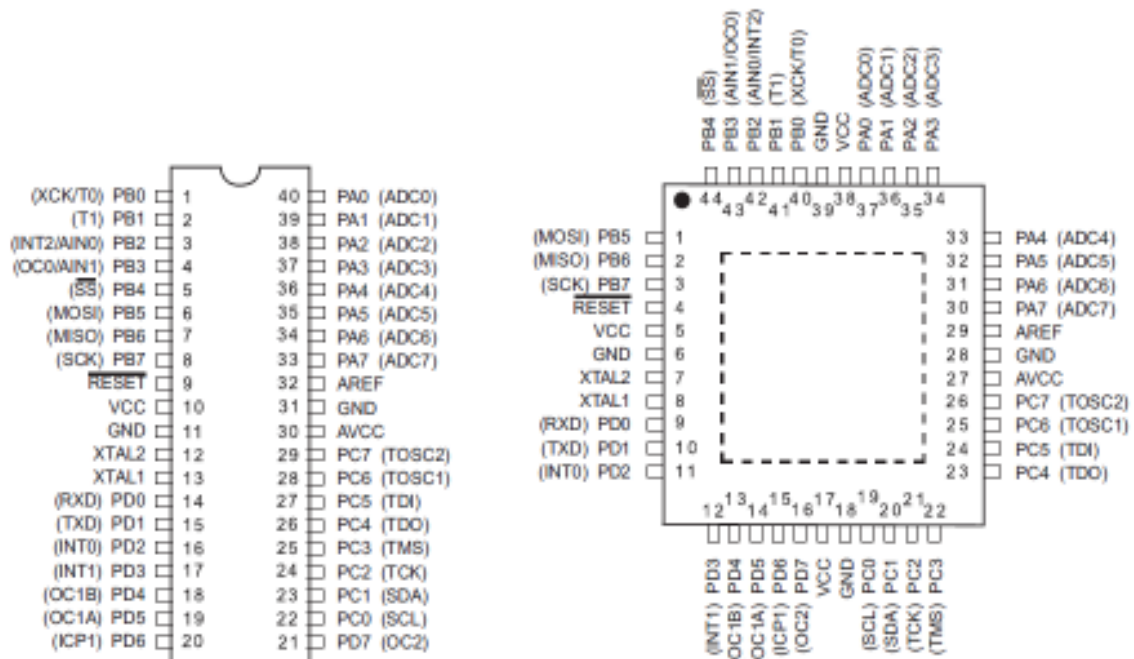
Známe všechny veličiny až na frekvenci, kterou je potřeba změřit, abychom mohli zpětně dopočítat požadovanou kapacitu. Velikost hledané kapacity odpovídá měřené dřevině a její vlhkosti.

Měření frekvence je založené na přepočtu frekvence na periodu, tyto periody se přičítají do proměnné v měřícím cyklu dokud nedojde k přetečení TIMERu. Doba měření trvá přibližně 4,1 s. Což je doba při které dojde k přetečení TIMERu, při frekvenci 16 MHz a nesmíme zapomenout počítat s dobou trvání obslužných instrukcí. Z tohoto důvodu zatím budeme používat hodnotu 4,1 s, která se následně kalibrací upraví na přesnější hodnotu, již bez doby trvání instrukcí. Dále se změřená hodnota vydělí počtem opakování a tím se získá průměrná perioda. Z takto získané periody se vypočte průměrná frekvence a pomocí výše uvedených vztahů dopočítá požadovaná kapacita.

### 3.2.1 ATmega16

ATmega16 je mikrokontrolér firmy Atmel. Využívá architektury RISC. Integrovaný obvod v pouzdře se vstupy a výstupy, většina je softwarově nastavitelná. Obvod nepatří mezi nejlevnější, ale nabízí pěkný poměr cena/výkon.

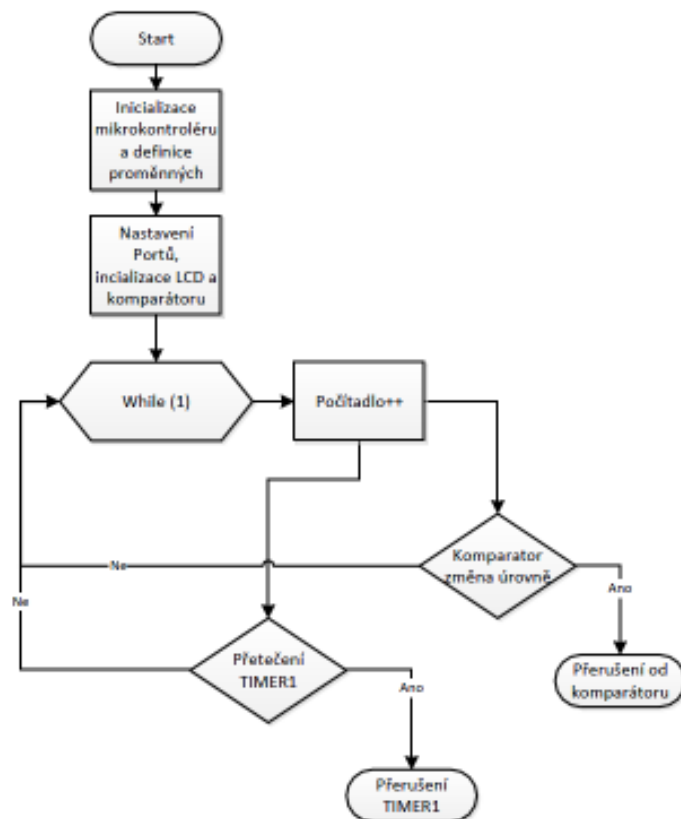
Mikrokontrolér obsahuje 16kB Flash paměti, 512B EEPROM a 1kB interní SRAM. Dále obsahuje bohatou periferii za zmínku stojí dva 8-bitové časovače/čítače, 16-bitový časovač/čítač, interní komparátor a další. Pracovní napětí je 4,5 až 5,5V. [16]



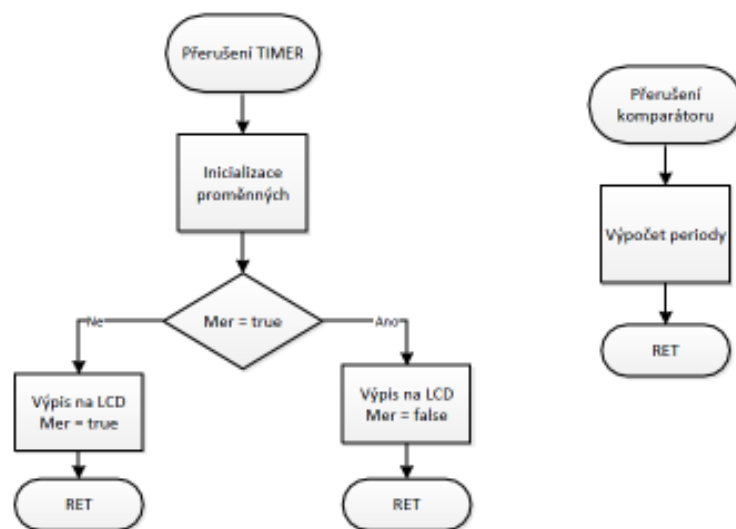
Obr. 30 ATmega16 – 16PU a ATmega16 – 16AU. Převzato [16]

V této práci je použit mikrokontrolér s pouzdrém typu PU. Pro snadnější manipulaci se používá patice. Patice se pájí na DPS a do ní je umístěn příslušný mikrokontrolér (z důvodu možnosti výměny). Pro ATmega16 se používá precizní patice DIL40. DIL40 označuje počet pinů.

### 3.2.2 Vývojový diagram kapacitního senzoru



Obr. 31 Vývojový diagram hlavního programu



Obr. 32 Vývojové diagramy přerušení

### 3.2.3 Měření

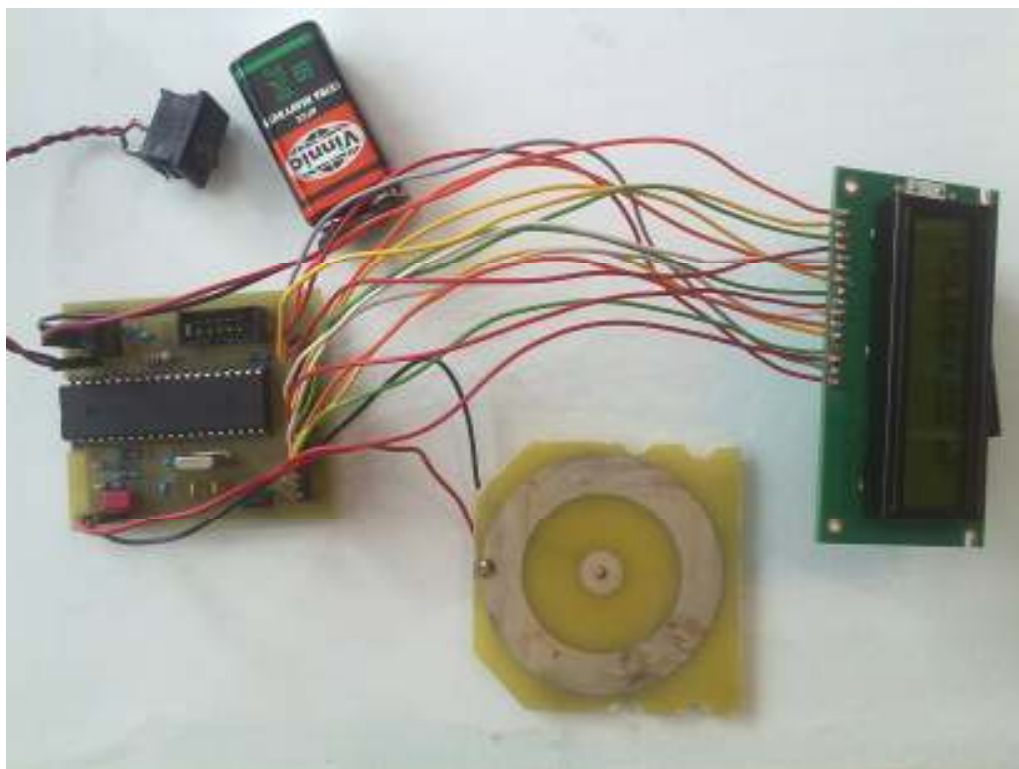
Bylo provedené na několika druzích stromů o různých průměrech, při pokojových teplotách. Senzor byl přímo umístěn na kmen a měření bylo prováděné opakovaně. Přístroj zapnutý s odejmutým senzorem ukazuje velikost kondenzátoru který je paralelně připojen k senzoru. Kapacita tohoto kondenzátoru je 220 pF, přístroj ukazuje 216 pF což je 2 % odchylka od hodnoty udávané výrobcem (kondenzátor s tolerancí 10 %). Po připojení senzoru vzroste kapacita, ale pouze na 223 pF. Což znamená, že kapacita senzoru je pouze 7 pF (dielektrikum vzduch), ale podle simulačních hodnot v programu ANSYS by kapacita senzoru (bez dielektrika) měla být asi 70 pF. Odsimulovaný dosah senzoru se pohyboval okolo 20 – 25 mm. Tato vzdálenost byla ve skutečnosti bohužel mnohem menší.

#### 3.2.3.1 Naměřené hodnoty

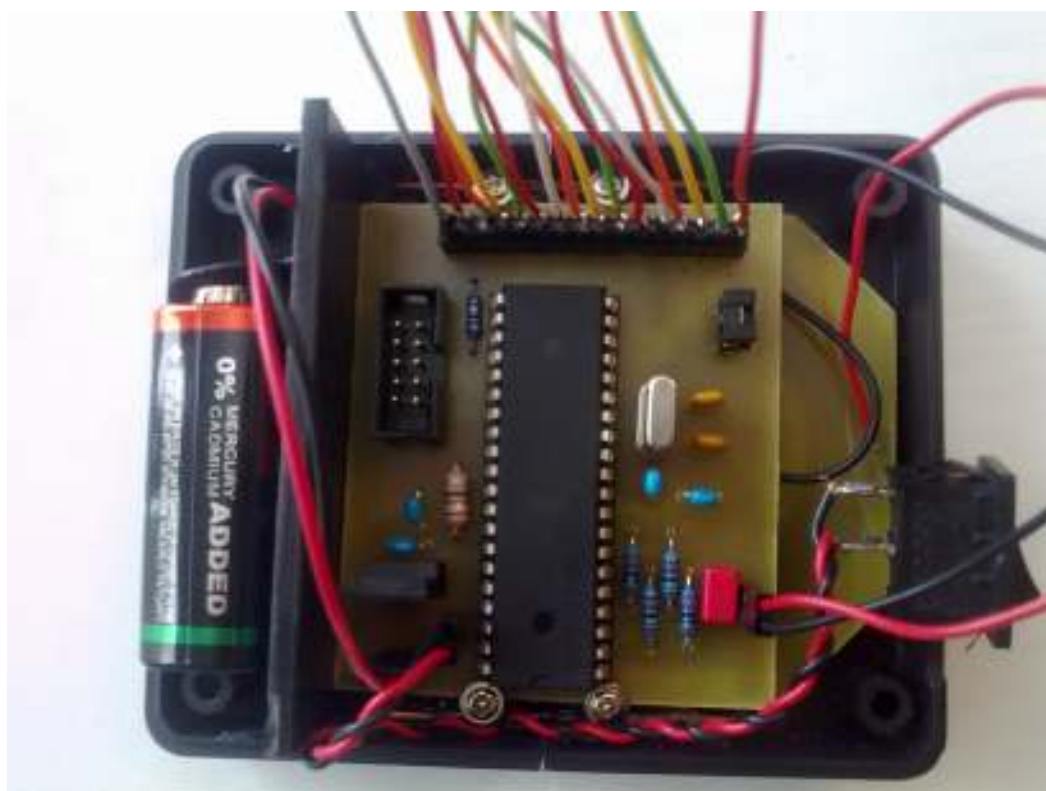
Tab. 4 Naměřené hodnoty kapacitním senzorem

Odhadovaný průměr stromu	Kapacita [pF]	Kapacita [pF]	Kapacita [pF]	Kapacita [pF]	Kapacita [pF]
8 cm	223,3	223	223,1	223,2	223,1
20 cm	223,4	223,8	223,2	223,3	223,2
22 cm	223,1	223,3	223,2	223,1	223,4
26 cm	223,2	223,4	223,4	223,2	223,3
28 cm	223,3	223,2	223,2	223,2	223,3
30 cm	223,1	223	223	223,1	223

Naměřené hodnoty potvrzují výše uvedenou domněnku a to, že zvolený tvar senzoru není vhodný pro měření vlhkosti. Odměřená velikost pole, která ovlivňuje kapacitu senzoru je pouze 2 mm což je nedostačující. S touto vzdáleností naměřené hodnoty ovlivnila kůra měřených stromů. Měřený strom o průměru 30 cm byl pokrytý velkou členitou vrstvou kůry a proto změřené změny se v několika případech neprojeví.



Obr. 33 Realizace zařízení



Obr. 34 Realizace zařízení – usazení do boxu



Obr. 35 Uzavřené zařícení - měření



Obr. 36 Uzavřené zařícení – naměřená hodnota

## ZÁVĚR

Z naměřených hodnot u obou typů senzorů vyplývá, že řešená problematika se musí řešit pomocí speciálních simulací. Nedestruktivní metody měření jsou závislé na teplotě a mnoha dalších proměnných, které je potřeba pečlivě eliminovat, aby bylo možné dosáhnout objektivních výsledků.

Největším problémem spjatým s indukční metodou měření je teplotní závislost některých součástí. U kapacitního zařízení při soustavné činnosti vzrostla kapacita senzoru o 1 – 2 pF, což je nevhodné při užití navrženého kapacitního senzoru. Za předpokladu, že by senzor měl teoretickou kapacitu, by tato odchylka nebyla problém.

Jelikož zařízení pracuje jako měřič kapacity bylo odzkoušeno pro měření kondenzátorů řádů „pikofarad“. Hodnoty byly v toleranci udávané výrobcem a blížily se hodnotám naměřeným přístrojem (hodnoty kapacitního zařízení byly o 216 pF a malou odchylku vyšší).

Vhodnou volbou by bylo vytvořit převodní tabulku pomocí které by se změřená kapacita mohla převést přímo na relativní vlhkost. Tato převodní tabulka by se musela vytvořit pomocí přesného laboratorního měření dřevin s přesně danou vlhkostí. Následný přepočet by bylo možné integrovat do použitého mikrokontroléru.

# LITERATURA

- [1] ČERMÁK, Jan a Naděžda NADĚŽDINA. Evaporace a evapotranspirace. [online]. 23.3.2005, s. 7 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: [www.cbks.cz/sbornik05/prispevky/sbornikEvaporace.pdf](http://www.cbks.cz/sbornik05/prispevky/sbornikEvaporace.pdf)
- [2] Agilent VEE Pro: VEE Pro User's Guide [online]. Loveland, 2004, s. 574 [cit. 2011-12-21]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E2120-90011.pdf>
- [3] HP 3588A Spectrum Analyzer, Hewlett Packard Journal, June 1991, pp.46-48
- [4] ĎAĎO, Stanislav. Koherentní demodulace a její využití v měřicí technice [online]. Praha, 18. listopadu 2011, s. 70 [cit. 2011-12-22].
- [5] Ďaďo S.: Měření impedance buněk. In: Sborník Nové smery zpracovania signálov, NSZS 2010, Tatranské Zruby květen 2010
- [6] Čičmanec, P., *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetizmus*, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.
- [7] Zesilovače. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: [www.zesilovace.cz](http://www.zesilovace.cz)
- [8] Balluff CZ s.r.o. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://www.snimace.cz/kapacitni-snimace.asp>
- [9] Sadabat Elektronik. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://www.sadabatelektronik.net/ferit.html>
- [10] MARTINEK, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [11] KESL, Jan. Elektronika. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 119 s. ISBN 80-7300-206-X.
- [12] BASTIAN, Peter. Praktická elektrotechnika. 2. upr. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 303 s. ISBN 80-86706-15-X.
- [13] Csiro. Water use by tree plantations in South-East South Australia. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://csiro.au/resources/WaterUseByTreePlantations.html>
- [14] INRA, Centre de Recherches Forestikres, Station de Sylviculture et de Production, Champenou, B, P. 35, 54280 Seichamps, France
- [15] Elektrické a magnetické vlastnosti dřeva. Ústav nauky o dřevě. [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/50>
- [16] ATmega16 - AVR microcontroller, katalogový list (datasheet). Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>

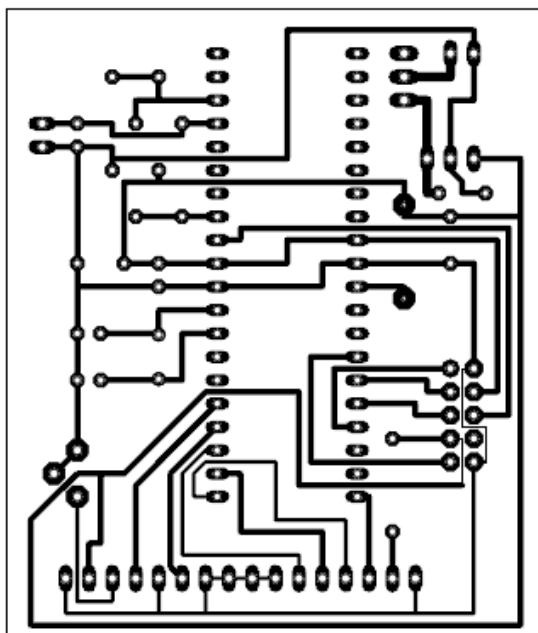


# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

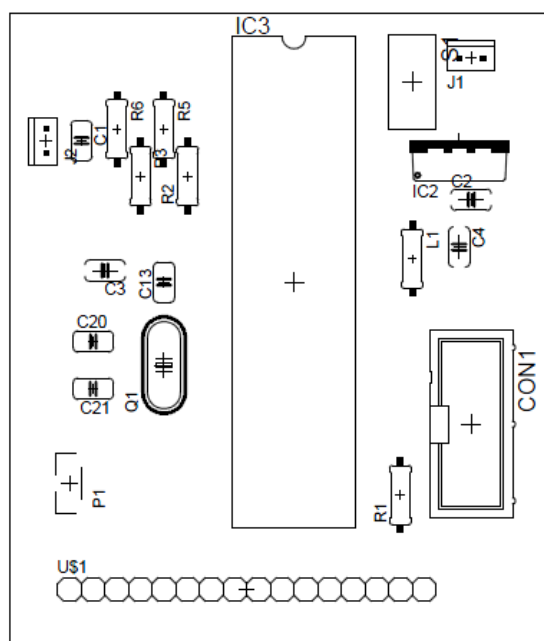
$\mu_r$	Permeabilita
$\epsilon_0$	Permitivita
$\epsilon_r$	Relativní permitivita
$I_x$	Proud z můstkového zdroje
V	Volt
U	Napětí
Z	Střední elektroda kondenzátoru
A	Kruhová elektroda kondenzátoru
d	vzdálenost elektrod kondenzátoru
$R_s$	Vnitřní odpor zdroje
$H_c$	Střední vodič koaxiálního kabelu
$R_R$	Referenční odpor
$\Delta C$	Změna kapacity
F	Farad
mF	Mili - Farad
$\mu F$	Mikro - Farad
nF	Nano - Farad
pF	Piko - Farad
$T_j$	To je
ss	stejnoseměrné
Obr	Obrázek
Tab	Tabulka
HBM	Metoda tepelné bilance
HPV	Metoda tepelného pulzu
THM	Metoda tepelné bilance kmene s přímým elektrickým ohřevem pletiv a vnitřním měřením teploty
DUT	Device Under Test
DDS	Metoda přímé digitální syntézy
DFT	Diskrétní Furierova transformace
R	Odpor RC oscilátoru
C	Kapacita RC oscilátoru

$\pi$	Ludolfovo číslo
$f$	Frekvence RC oscilátoru
$C_1$	Kapacita kondenzátoru C1
$C_2$	Kapacita senzoru
DPS	Deska plošných spojů
$f_{\text{rez}}$	Rezonanční frekvence
$U_{\text{rez}}$	Napětí při rezonanci

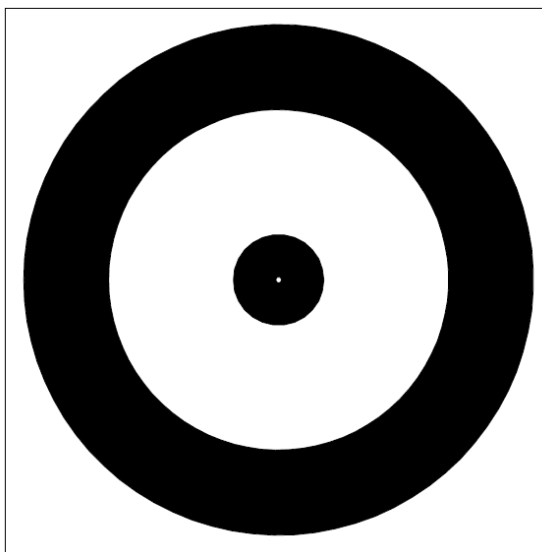
# PŘÍLOHY



Obr. 37 Deska plošných spojů



Obr. 38 Osazování deska plošných spojů



Obr. 39 Deska plošných spojů - senzor

Obr. 40 Schéma zapojení senzoru



# SEZNAM SOUČÁSTEK

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	220p	C-EU050-024X044	C050-024X044	rcl	1
C2	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044	rcl	1
C3	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044	rcl	1
C4	100nF	C-EU050-024X044	C050-024X044	rcl	1
C13	100n	C-EU025-024X044	C025-024X044	rcl	1
C20	22p	C-EU025-024X044	C025-024X044	rcl	1
C21	22p	C-EU025-024X044	C025-024X044	rcl	1
CON1	MLW10	MLW10	MLW10	con-amp1	1
IC2	7805TV	7805TV	TO220V	linear	1
IC3	MEGA16-P	MEGA16-P	DIL40	atmel	1
J1	MTA02-100	10X02MTA	10X02MTA	con-amp	1
J2	MTA02-100	10X02MTA	10X02MTA	con-amp	1
L1	10uH	L-US0207/10	0207/10	rcl	1
P1	PT-6_H-STOJ		PT6H	con-amp1	1
Q1	16MHz	HC49U-V	HC49U-V	crystal	1
R1	27	R-EU_0207/10	0207/10@1	rcl	1
R2	10k	R-EU_0207/10	0207/10@1	rcl	1
R3	1k5	R-EU_0207/10	0207/10@1	rcl	1
R5	1k5	R-EU_0207/10	0207/10@1	rcl	1
R6	10k	R-EU_0207/10	0207/10@1	rcl	1
S1	TL36PO	TL36PO	TL3XPO	switch	1
U\$1	LCD_HD44780		LCD_HD44780	HD44780	1